

## 冷温帯落葉広葉樹林における CO<sub>2</sub> フラックスの日変化 —2013 年と 2014 年のデータ比較—

### Diurnal changes in CO<sub>2</sub> flux from a cool-temperate deciduous broadleaved forest in Japan - A comparison of data for 2013 and 2014 -

山口由乃<sup>\*1</sup>・小坂泉<sup>\*1</sup>・志田俊介<sup>\*1</sup>・本崎樹<sup>\*1</sup>・瀧澤英紀<sup>\*1</sup>・阿部和時<sup>\*1</sup>  
Yukino YAMAGUCHI<sup>\*1</sup>, Izumi KOSAKA<sup>\*1</sup>, Syunsuke SHIDA<sup>\*1</sup>, Tatsuki HONZAKI<sup>\*1</sup>,  
Hideki TAKIZAWA<sup>\*1</sup> and Kazutoki ABE<sup>\*1</sup>

\* 1 日本大学生物資源科学部

Coll. of Bioresource Sci., Nihon Univ., Fujisawa 252-0880

**要旨：**本研究では、ブナ (*Fagus crenata*) が優占する冷温帯落葉広葉樹林において、CO<sub>2</sub> フラックスの日変化から CO<sub>2</sub> 吸収・放出の実態と特徴について 2013 年と 2014 年を比較し、両者の違いとその要因について明らかにすることを目的とする。観測は、群馬県利根郡みなかみ町に位置する日本大学水上演習林内の高平山山頂に建設された高さ 6 m の観測塔にて、2013 年 1 月から 2014 年 8 月の期間において渦相関法を用いて行われた。その結果、両年とも 6 月において下向き CO<sub>2</sub> フラックスが増加するが、その日中のピーク値は 2013 年では約-19.2 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>、2014 年では約-13.4 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> となり、2014 年において日中の下向き CO<sub>2</sub> フラックスが減少する傾向がみられた。この要因として、2014 年の葉量の減少や夜間の上向き CO<sub>2</sub> フラックスの増加、および 2014 年の 7 月および 8 月の飽差が 2013 年のものに比べ比較的高く、15hPa 以上になる場合が多く、大気が乾燥していたことなどが考えられた。

**キーワード：**CO<sub>2</sub> フラックス、冷温帯落葉広葉樹、渦相関法、山地森林

**Abstract :** To investigate the characteristic of diurnal changes in CO<sub>2</sub> flux from a cool-temperate deciduous broadleaved forest (dominated by *Fagus crenata*), continuous flux measurements were made from a tower located on the summit of Mt. Takahira (36°48'N, 139°02'E, 985 m.a.s.l) at Nihon University Forest in Minakami-machi, Tone-gun, Gunma, Japan. The measurements were conducted using an eddy correlation method from January 2013 to August 2014. The maximum values of CO<sub>2</sub> flux in June 2013 and 2014 were approximately -19.2 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> and -13.4 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>, respectively. The downward CO<sub>2</sub> flux in 2014 was smaller than that in 2013. It was found that the difference was mainly the result of smaller leaf area index and higher nighttime upward CO<sub>2</sub> flux in 2014. In addition, vapor pressure deficit in July and August 2014 was higher than that 2013.

**Keywords:** CO<sub>2</sub> flux, cool-temperate deciduous broadleaved forest, eddy correlation method, mountainous forest region

#### I はじめに

近年、世界規模での平均気温の上昇が問題となっている。IPCC 第 5 次評価報告書によると、1950 年から 2100 年にかけて、最大で 4.8°C の気温上昇が予測されている (3)。その原因として温室効果ガスの増加が考えられているが、中でも CO<sub>2</sub> は温暖化への影響が大きいとされている。温暖化などの気候変動が陸域生態系に与える影響を考える上で、陸地の 3 割を占める森林においての CO<sub>2</sub> 移動について明らかにすることは重要である。現在、大気-森林間の熱・水・CO<sub>2</sub> 移動に関して渦相関法を用いた連続測定が様々な気候带で行われている (8)。落葉林における日中の下向き CO<sub>2</sub> フラックスは、展葉と共に光合成による CO<sub>2</sub> 吸収量が急激に増加し、光合成有効放射量の影響を強く受けるが (II)，日本の安比高原における

ブナ林では気温 (10)、東フランスのブナの幼齢林では土壤水分 (2) との強い関連があることが報告されている。落葉林における CO<sub>2</sub> フラックスに与える環境要因は、森林のタイプ、気候帶および立地条件などにより異なるため、様々な条件下での研究の蓄積が必要である。

本研究では、気候変動により分布確率が著しく減少することが報告されている (5) ブナ (*Fagus crenata*) が優占する冷温帯落葉広葉樹林を対象に、渦相関法による CO<sub>2</sub> フラックスの連続測定を実施している (4)。本稿では、これまでに取得されたデータを用いて 2013 年と 2014 年における日中の CO<sub>2</sub> フラックスを比較し、両者の違いと、その要因について明らかにすることを目的とする。

#### II 方法

観測地は群馬県利根郡みなかみ町の日本大学水上演習林（ $36^{\circ}48'N$ ,  $139^{\circ}02'E$ , 標高 650-985m）である。優占樹種はブナ（*Fagus crenata*）であり、その他にコナラ（*Quercus serrata*）などの落葉広葉樹が混在する 50~60 年生の二次林である。着葉期は 5 月上旬から 11 月上旬であり、着葉期の葉面積指数の最大値は約  $4 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$  である（7）。測定は演習林内に位置する高平山の山頂（標高 985m）に建設された 6 m の観測塔の先端に超音波風速温度計（CSAT3, Campbell）および Open-Path 型  $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$  分析器（EC150, Campbell）を設置して行われた。10Hz の測定間隔で出力される 3 次元風速、音仮気温、 $\text{CO}_2$  濃度および  $\text{H}_2\text{O}$  濃度のデータをデータロガー（CR1000, Campbell）に記録し、渦相関法により  $\text{CO}_2$  フラックスを算出した。なお、各フラックスの平均化時間は 30 分とし、その算定過程において McMillen（6）による座標変換および Webb et al.（9）による密度補正を行った。Foken and Wichura（1）が提示した定常性の検査を行い、解析に不適なデータを取り除いた。降雨時の 2 時間前後のデータは、センサー感部の間の雨粒により、ノイズを含む可能性があるので省いた。これらの品質管理により約 67% のデータが削除された。観測塔の頂上に光量子センサー（PAR-02, Prede）および温湿度センサー（HMP155A, Vaisala）を設置し、PAR（photosynthetically active radiation; 光合成有効放射量）と温湿度を計測した。解析期間は 2013 年 1 月 1 日から 2014 年 8 月 30 日である。

### III 結果および考察

1.  $\text{CO}_2$  フラックスの日変化 図-1 は、2013 年と 2014 年の各月における同時刻の 30 分データを集計して月平均した  $\text{CO}_2$  フラックスの日変化を示したものである。図

中の丸印は月平均値、エラーバーはその標準偏差を示す。渦相関法で得られる  $\text{CO}_2$  のフラックスは、鉛直上向きを正にとるため、正の値は森林群落から大気への  $\text{CO}_2$  の放出を、負の値は大気から森林群落への吸収を表している。図-1において、積雪のある 12~3 月は日中に僅かな正の値をとるが、全体的にみると変動幅は小さい。展葉の始まる 5 月から、日中の下向き  $\text{CO}_2$  フラックス（以下、 $\text{CO}_2$  吸收量）は増大する傾向を示した。この傾向は 2013 年、2014 年で共通している。着葉期の 6 月、7 月、8 月における  $\text{CO}_2$  吸收量の月平均値のピークは、2013 年ではそれぞれ約  $-19.2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 、約  $-18.5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 、約  $-9.7 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 、2014 年では、それぞれ約  $-13.4 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 、約  $-6.9 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 、約  $-4.9 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  となり、6 月で最大となることは両年で共通している。しかし、2014 年の  $\text{CO}_2$  吸收量は 2013 年のものに比べて減少していることがわかった。2013 年および 2014 年の夜間の上向き  $\text{CO}_2$  フラックス（以下、 $\text{CO}_2$  放出量）について、両年での違いはあまり明瞭でないものの、2014 年の  $\text{CO}_2$  放出量は 2013 年のものに比べやや大きい傾向がみられた。

図-2 は、2013 年および 2014 年の 6 月、7 月、8 月における同時刻の 30 分データを集計して月平均した飽差、PAR および気温の日変化を示したものである。図中の実線は月平均値、エラーバーはその標準偏差を示す。図-2 (a1) (a2) において、飽差の月平均の最大値は、2014 年 7 月および 8 月で約 11hPa を示し、2013 年のものに比べ、やや高い傾向を示した。図-2 (b1) (b2) で示した 2013 年と 2014 年における PAR の月平均値のピークは  $1300 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  前後を示し、両年における PAR の日変化の違いはあまりみられない。図-2 (c1) (c2) において、2013 年と 2014 年の同じ月における

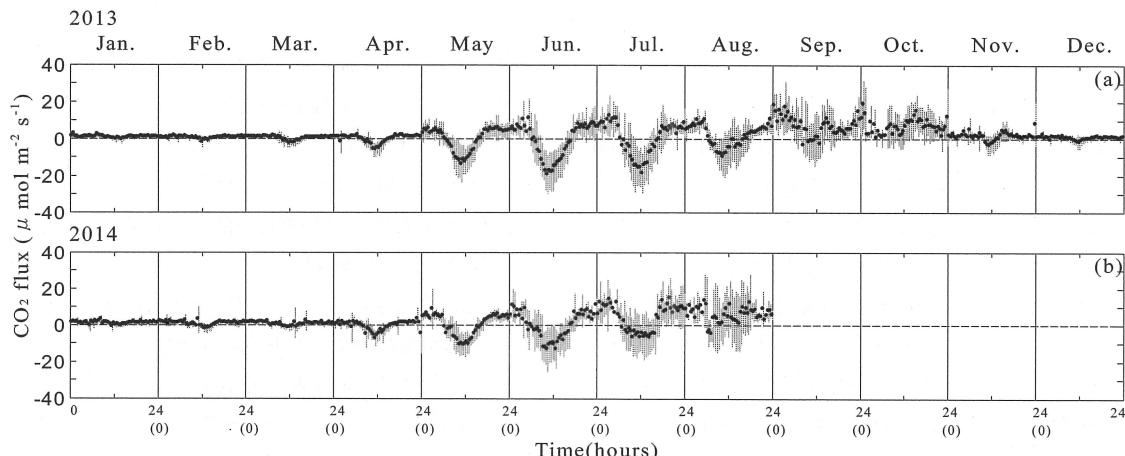


図-1. 月平均した (a) 2013 年、(b) 2014 年の  $\text{CO}_2$  フラックスの日変化

Fig.1 Monthly average diurnal changes in half-hourly (a)  $\text{CO}_2$  flux from January to December in 2013, (b)  $\text{CO}_2$  flux from January to August in 2014. In the figure the top and bottom of the vertical bars indicate the standard deviation. The bold dots show the monthly average.

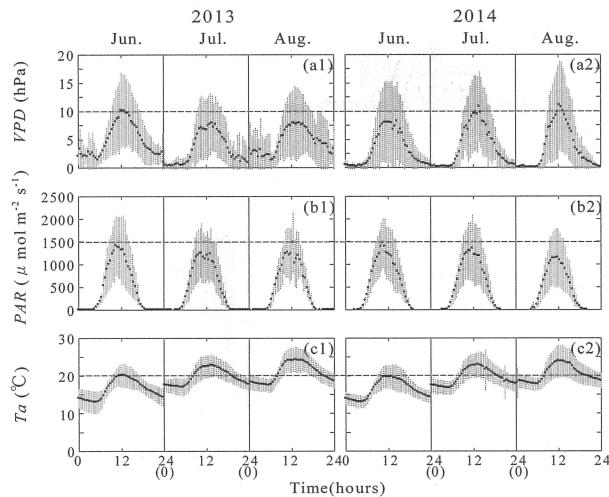


図-2. 月平均した(1)2013年および(2)2014年の(a)飽差, (b)光合成有効放射量, (c)気温の日変化

Fig.2 Monthly average diurnal changes in half-hourly (a) vapor pressure deficit(VPD), (b) photosynthetically active radiation(PAR), (c) air temperature(Ta) from Jun to August. In the figure the top and bottom of the vertical bars indicate the standard deviation. The bold dots show the monthly average.

気温の月平均ピークを比較すると、6月で約20°C、7月で約23°C、8月で約24°Cとほぼ同じ値を示し、両年において気温の日変化の違いは、ほとんどみられなかった。

**2. PAR と CO<sub>2</sub> フラックスの関係** 図-3は、a) 6月, b) 7月, c) 8月におけるCO<sub>2</sub> フラックスとPARの関係を示す。図-3において、黒点が2013年、白点が2014年のデータを表した。また、図-3において、飽差が15hPa以上の場合のデータについては、2013年のものを灰点、2014年のものを◎印で示した。

6月および7月のデータを示した図-3 a) および図-3 b)において、PARの増加に伴いCO<sub>2</sub> 放出量が増加する関係がみてとれる。一方、8月のデータを示した図-3 c) では、データにばらつきがみられ、両者に明瞭な関係はみられない。2013年と2014年におけるPARとCO<sub>2</sub> フラックスの関係を比較すると、2014年のデータは2013年のものに比べ、CO<sub>2</sub> 放出量が小さい傾向を示した。図-3 a) ~ c)において、PARが1500 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>以上の場合、PARとCO<sub>2</sub> フラックスの関係は不明瞭であるが、飽差が15hPa以上のデータに着目すると、2013年より2014年のものが比較的多くみられる。

**3. 飽差とCO<sub>2</sub> フラックスの関係** 図-4は、PARが1500 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>以上の場合について、a) CO<sub>2</sub> フラックスと飽差の関係を示し、図-4 b) およびc) に飽差とCO<sub>2</sub> フラックスの頻度分布をそれぞれ示す。左側は2013年、

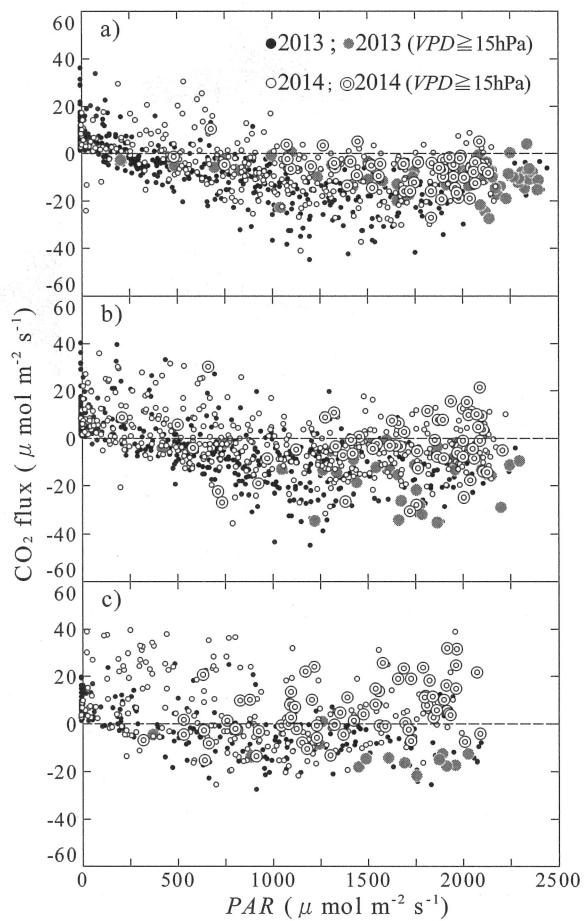


図-3. 2013年および2014年のa)6月, b)7月, c)8月におけるCO<sub>2</sub> フラックスとPARの関係

Fig.3 Relationships between half-hourly CO<sub>2</sub> flux and photosynthetically active radiation (PAR) in 2013 and 2014. a) June; b) July; c) August

右側は2014年のデータを表している。2013年と2014年の飽差は、両年とも10~15hPaの範囲に最も多く分布するが、飽差が15hPa以上に占める割合は、2013年では31%、2014年では38%であり、2014年において大気が乾燥した傾向がみられた。図-4 a1) および a2) で示した飽差とCO<sub>2</sub> フラックスの関係では、両年ともにデータにばらつきがみられるため、飽差について5hPa毎に区分して求めた平均CO<sub>2</sub> フラックスを白丸で示し、図中の実線は両者の近似直線を表す。その結果、両年とも飽差の増加に伴い、CO<sub>2</sub> フラックスが徐々に増加する傾向を示した。これは、大気の乾燥による気孔開閉の抑制や光合成活性の低下などによる影響があると考えられる。以上より、着葉期においてPARが1500 μmol<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>以上である場合、飽差がCO<sub>2</sub> 吸収量を減少させる要因の1つであると考えらえる。しかしながら、図-4 a1) および a2) で示された近似直線の切片は、それぞれ-20.72および-7.92 μmol<sup>-2</sup> と異なる。

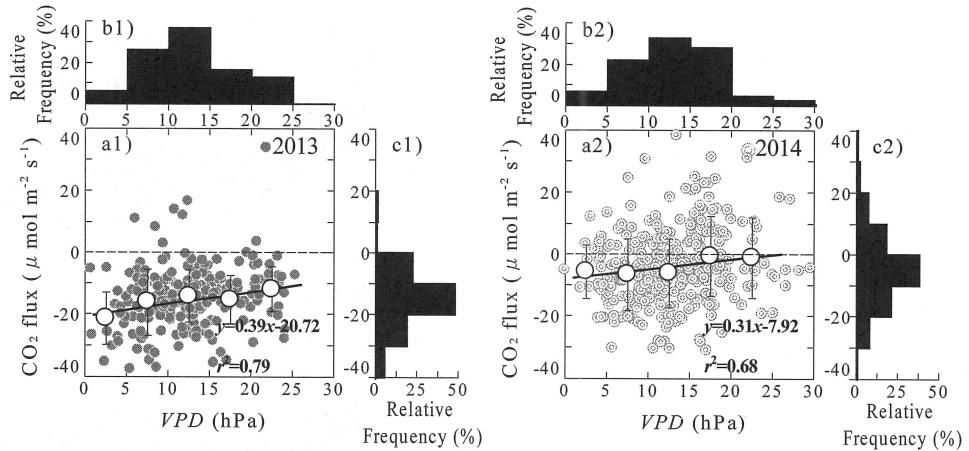


図-4. 1) 2013年および2) 2014年におけるa)CO<sub>2</sub>フラックスと飽差(VPD)の関係およびそれぞれの頻度分布

Fig.4 Relationships between half-hourly a) CO<sub>2</sub> flux and vapor pressure deficit(VPD) from June to August in 2013and 2014.  
Frequency distribution of b) VPD and c) CO<sub>2</sub> flux. (PAR $\geq$ 1500μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>)

そのため、2013年と2014年のCO<sub>2</sub>吸収量が異なる要因は、他にあると考えられる。野中ら(7)によれば、本サイトにおいて樹冠の日射透過率から算定された2013年および2014年の着葉期の葉面積指数は、それぞれ3.9および3.6 m<sup>2</sup> m<sup>-2</sup>と推定され、2014年の葉量が2013年のものに比べ小さいことを図示している。2014年のCO<sub>2</sub>吸収量が2013年のものに比べ全体的に小さい傾向を示した要因として、まず2014年の葉量が減少したことが考えられる。さらに図-1で示した2014年のCO<sub>2</sub>放出量の増加、すなわち、葉量の減少により地温の上昇などにより土壤呼吸量が増加したことでも要因として考えられる。

#### 引用文献

- (1) FOKEN, T. and WICHURA, B. (1996) Tools for quality assessment of surface-based flux measurements. Agric For Meteorol **78** : 83-105
- (2) GRANIER, A., CESCHIA, E., DAMESIN, C., DUFRÈNE, E., EPRON, D., GROSS, P., LEBAUBE, S., Le DANTEC, V., Le GOFF, N., LEMOINE, D., LUCOT, E., OTTORINI, J.M., PONTAILLER, J.Y. and SAUBIER, B. (2000) The carbon balance of a young beech forest. Funct Ecol **14** : 312-325
- (3) 環境省 HP“気候変動に関する政府間パネル（IPCC）第5次評価報告書(AR5)について”<http://www.env.go.jp/earth/ipcc/5th/index.html>
- (4) 小坂泉・瀧澤英紀・小林昌平・佐々木千鶴・中村貴雄・掛谷亮太・阿部和時(2014) 冷温帶落葉広葉樹林におけるCO<sub>2</sub>フラックスの季節変化. 関東森林研究 **65** : 181-184
- (5) MATSUI, T., YAGIHASHI, T., NAKAYA, T., TAODA, H., YOSHINAGA, S., DAIMARU, H. and TANAKA, N.(2004) Probability distributions, vulnerability and sensitivity in *Fagus crenata* forests following predicted climate changes in Japan. J Veg Sci **15** : 605-614
- (6) MCMILLEN, R.T. (1988) An eddy correlation technique with extended applicability to non-simple terrain. Boundary-Layer Meteorol **43** : 231-245
- (7) 野中翔平・小坂泉・川口美優・瀧澤英紀・阿部和時(2015) 冷温帶落葉広葉樹林におけるLAIの季節変化. 関東森林研究 **66** : 107-110
- (8) SAIGUSA, N., YAMAMOTO, S., HIRATA, R., OHTANI, Y., IDE, R., ASANUMA, J., GAMO, M., HIRANO, T., KONDO, H., KOSUGI, Y., LI, S.G., NAKAI, Y., TAKAGI, K., TANI, M. and WANG, H. (2008) Temporal and spatial variations in the seasonal patterns of CO<sub>2</sub> flux in boreal, temperate, and tropical forests in East Asia. Agric For Meteorol **148** : 700-713
- (9) WEBB, E.K., PEARMAN, G.I. and LEUNING, R.(1980) Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapor transfer. Q J R Meteorol Soc **106** : 85-100
- (10) YASUDA, Y., SAITO, T., HOSHINO, D., ONO, K., OHTANI, Y., MIZOGUCHI, Y. and MORISAWA, T.(2012) Carbon balance in a cool-temperate deciduous forest in northern Japan: seasonal and interannual variations, and environmental controls of its annual balance. J For Res **17** : 253-267
- (11) 安田幸生・渡辺力・大谷義一・岡野通明・中山敬一(1998) 落葉広葉樹林上におけるCO<sub>2</sub>フラックスの季節変化. 水水学会誌 **11** : 575-585